

УДК 621.372.543

В.В.Попов, Е.В.Петров, А.Ю.Беляков

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУППОВОГО ВРЕМЕНИ ЗАПАЗДЫВАНИЯ ФИЛЬТРОВ СВЧ

Институт электронных и информационных систем НовГУ, popov_v_v_79@mail.ru

The method for determination of microwave devices to minimum-phase or non-minimum-phase chains is presented. Calculation of group delay time based on amplitude-frequency characteristics for microwave devices related to minimum-phase chains is made.

Ключевые слова: групповое время запаздывания, амплитудно-частотные характеристики, СВЧ устройства

Введение

При передаче большого количества информации в системах связи возникают искажения сигнала, вызванные нелинейностью фазовых характеристик элементов связи, в частности фильтров, и, следовательно, разным временем прохождения через фильтры различных спектральных компонент передаваемого сигнала. Величина $\varphi = f(\omega)$, характеризующая нелинейность фазо-частотной характеристики (ФЧХ), называется групповым временем запаздывания (ГВЗ) сигнала: $\tau = -d\varphi(\omega)/d\omega$. Требования к неравномерности группового времени запаздывания сигнала особенно существенны в линиях, использующих частотную модуляцию. Так, например, для современных высококачественных радиорелейных линий желательно иметь неравномерность ГВЗ меньше 10^{-9} с [1].

Измерение ГВЗ в процессе изготовления фильтра требует использования дорогостоящих векторных измерителей характеристик цепей (например, Р4М-18). В то же время ГВЗ можно определить по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ), измеренной с помощью более доступного скалярного измерителя характеристик цепей (например, Р2М-18), если установлена однозначная связь между АЧХ и ФЧХ.

Таким образом, при разработке и изготовлении фильтров СВЧ возникает две противоречивые задачи.

1. Оптимизация фильтра сразу по двум характеристикам — АЧХ и ГВЗ. В этом случае должна отсутствовать жесткая связь между АЧХ и ГВЗ (ФЧХ).

2. Возможность определения ГВЗ по данным измерения АЧХ с помощью скалярного измерителя характеристик цепей СВЧ. В этом случае должна быть однозначная связь между АЧХ и ГВЗ (ФЧХ).

Чтобы связь между АЧХ и ФЧХ были однозначной, цепь должна быть минимально-фазовой. Для минимально-фазового звена характерно, что у него сдвиг фаз по модулю меньше, чем у неминимально-фазового звена, имеющего одинаковую с минимально-фазовым звеном АЧХ. Топологической особенностью минимально-фазовых цепей является отсутствие особых звеньев (фазовращателей) и параллельных путей движения энергии. Простейшим примером фазовращателя является отрезок однородной линии передачи без потерь. Модуль коэффициента передачи равен единице и не зависит от частоты, а фаза есть функция частоты, т.е. звено является неминимально-фазовым. Примером цепей с параллельными путями движения энергии являются цепи с перекрестными связями и мостовые цепи.

При анализе фильтров СВЧ, как правило, пользуются представлением их в виде лестничной цепи, которая относится к минимально-фазовым цепям. Корректность такого представления зависит от конструктивного исполнения и диапазона рабочих частот фильтров. К минимально-фазовым цепям можно отнести классические фильтры на сосредоточенных элементах. Фильтры на связанных линиях передач можно рассматривать как минимально-фазовую цепь в ограниченном диапазоне частот, в котором справедливо представление четвертьволновых связей в виде идеальных частотно независимых инверторов. В

цепочке связанных резонаторов связь должна быть только между соседними резонаторами.

Схемы построения фильтров могут отличаться от классических, в этом случае определить класс цепи становится весьма сложно. В настоящее время имеется ряд программных продуктов — MWO, CST, HFSS, которые существенно расширяют возможности анализа и выявления особенностей различных фильтрующих систем с учетом всех частотных зависимостей и связей между элементами системы.

Методика определения принадлежности фильтра СВЧ к минимально-фазовым или неминимально-фазовым цепям

В данной работе предлагается методика определения по результатам анализа фильтра СВЧ в среде CST принадлежности его к минимально-фазовым или неминимально-фазовым цепям. В соответствии с этой методикой проводится расчет АЧХ, ФЧХ и ГВЗ фильтра численным методом конечных интегралов. Затем проводится расчет ГВЗ по АЧХ по алгоритму, разработанному для минимально-фазовых цепей. В случае совпадения характеристики ГВЗ, рассчитанной по АЧХ, и характеристики ГВЗ, определенной в CST по ФЧХ, можно утверждать, что фильтр относится к минимально-фазовым цепям. В случае их несовпадения фильтр следует отнести к неминимально-фазовым цепям.

Алгоритм расчета ГВЗ по АЧХ использует известную [2] связь между амплитудной и фазовой характеристиками цепи.

Если требуется установить связь между модулем и аргументом комплексной функции коэффициента передачи $S_{12}(j\omega) = |S_{12}(\omega)|e^{j\varphi(\omega)}$, то обычно используют более простую связь между действительной и мнимой частями функции комплексного переменного при следующих условиях: число полюсов конечно; отсутствуют полюса в правой полуплоскости переменного $p = \sigma + j\omega$ и на мнимой оси.

Введем новую функцию

$\Theta(j\omega) = \ln(|S_{12}(j\omega)|e^{j\varphi(\omega)}) = \ln|S_{12}(\omega)| + j\varphi(\omega) = A(\omega) + j\varphi(\omega)$.
Здесь действительная часть $A(\omega) = \ln|S_{12}(\omega)|$ — АЧХ в логарифмическом масштабе; мнимая часть — $\varphi(\omega)$ — ФЧХ. Связь между $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ устанавливается преобразованием Гильберта [2]:

$$\varphi(\omega_1) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{A(\omega)}{\omega - \omega_1} d\omega,$$

$$A(\omega_1) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\varphi(\omega)}{\omega - \omega_1} d\omega.$$

Интегралы берутся с исключением особой точки (главное значение интеграла). Дополнительным условием является отсутствие нулей S_{12} в правой полуплоскости (цепь должна быть минимально-фазовой).

Преобразование Гильберта на практике чаще всего осуществляется по алгоритму, согласно которому [3]:

— определяется с помощью комплексного БПФ преобразование Фурье ($S_{12}(\Omega)$) анализируемого $\ln|S_{12}(\omega)|$;

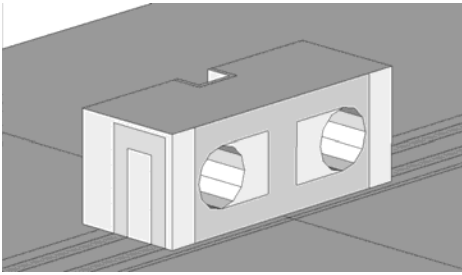


Рис.1. Двухрезонаторный гребенчатый фильтр

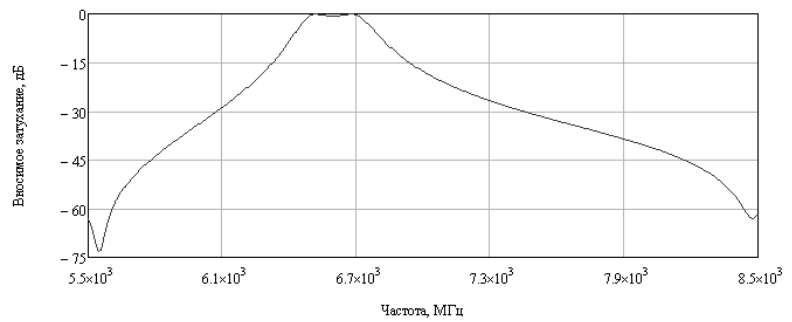


Рис.2. АЧХ двухрезонаторного гребенчатого фильтра

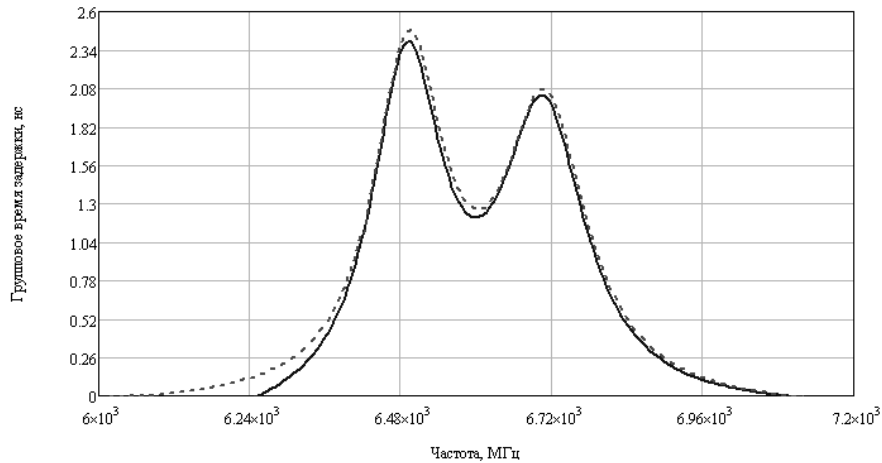


Рис.3. ГВЗ двухрезонаторного гребенчатого фильтра: - - - - рассчитанное в CST MWS с вычетом ГВЗ на согласующих линиях; ——— рассчитанное через АЧХ фильтра

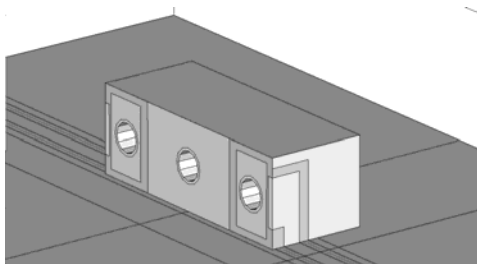


Рис.4. Трехрезонаторный встречностержневой фильтр

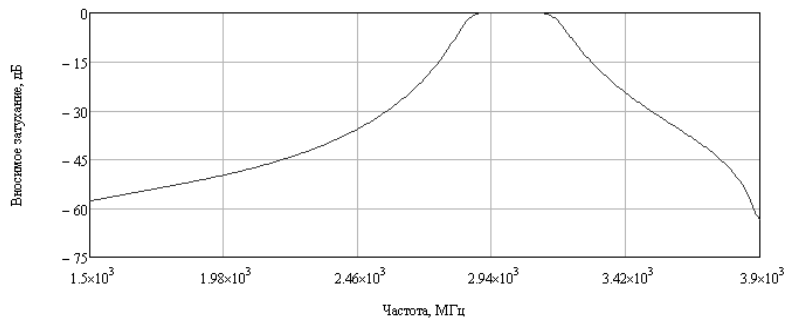


Рис.5. АЧХ трехрезонаторного встречностержневого фильтра

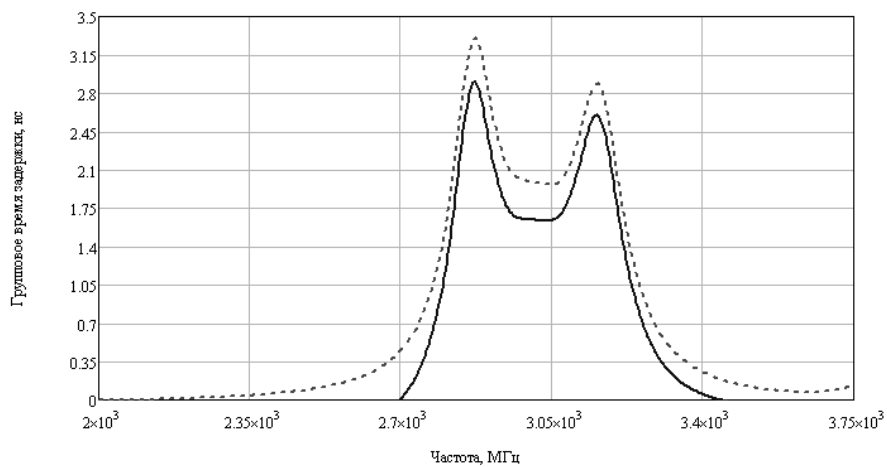


Рис.6. ГВЗ трехрезонаторного встречностержневого фильтра: - - - - рассчитанное в CST MWS с вычетом ГВЗ на согласующих линиях; ——— рассчитанное через АЧХ фильтра

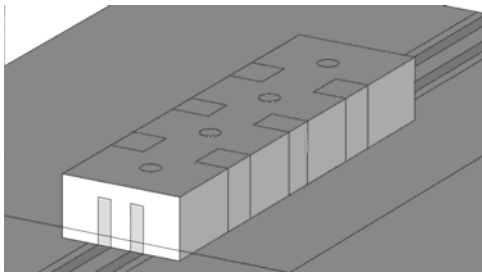


Рис.7. Четырехрезонаторный волноводный фильтр

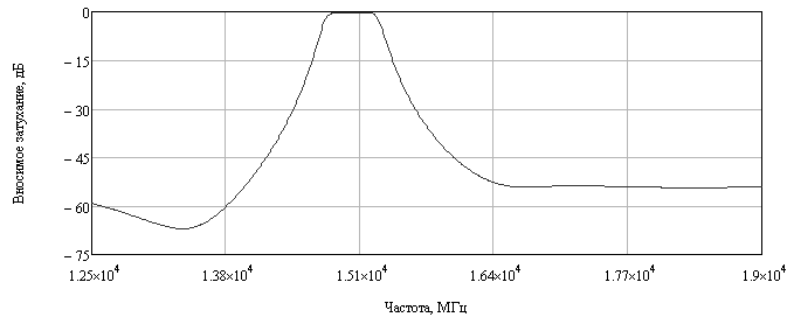


Рис.8. АЧХ четырехрезонаторного волноводного фильтра

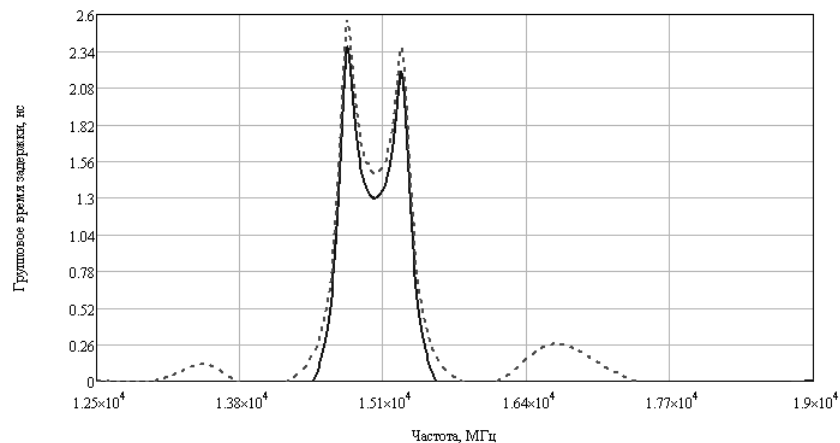


Рис.9. ГВЗ четырехрезонаторного волноводного фильтра: --- рассчитанное в CST MWS с вычетом ГВЗ на согласующих линиях; ——— рассчитанное через АЧХ фильтра

— вычисляется Фурье образ $Z(\Omega)$ аналитического сигнала:

$$Z(\Omega) = S_{12}(\Omega) + jS_{12}(\Omega) = \begin{cases} 2S_{12}(\Omega), & \Omega > 0, \\ 0, & \Omega < 0, \\ 1S_{12}(\Omega), & \Omega = 0; \end{cases}$$

— осуществляется обратное преобразование Фурье от $Z(\Omega)$ с помощью комплексного БПФ и находится $Z(\omega)$;

— определяется ФЧХ.

Искомая зависимость ГВЗ от частоты вычисляется по формуле

$$\tau = -\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega}.$$

Моделирование и анализ

Для проверки предложенной методики проводилось моделирование и анализ характеристик трех типов керамических малогабаритных фильтров: гребенчатого, встречно-стержневого и волноводного. Использовались программные продукты CST, Mathcad. Анализируемые конструкции, результаты моделирования и расчета ГВЗ по изложенному алгоритму приведены на рис.1-9.

Заключение

В результате проведенных исследований установлены следующие расхождения значений ГВЗ в полосе пропускания фильтра, полученной в CST из

ФЧХ и рассчитанной на основе АЧХ в Mathcad:

— для двухрезонаторного гребенчатого фильтра $\tau = 0,08$ нс;

— для трехрезонаторного встречно-стержневого фильтра $\tau = 0,39$ нс;

— для четырехрезонаторного волноводного фильтра $\tau = 0,19$ нс.

Полученные результаты расчета ГВЗ по предложенной методике для приведенных типов фильтров позволяют сделать следующие выводы.

1. Анализируемые конструкции фильтров можно отнести к минимально-фазовым цепям (присутствует однозначная связь между АЧХ и ГВЗ (ФЧХ)).

2. Предложенная методика может быть использована для определения принадлежности СВЧ устройства к минимально-фазовым или неминимально-фазовым цепям и оценки значения и неравномерности ГВЗ.

1. Андреев Д.П., Гак Н.Н., Цимблер И.И. Механически перестраиваемые приборы СВЧ и перестраиваемые фильтры. М.: Связь, 1973. С.31-32.
2. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Сов. радио, 1971. С.193-197.
3. Хованова Н.А., Хованов И.А.. Методы анализа временных рядов. Саратов: Изд-во Гос. учеб.-науч. центра «Колледж», 2001 — http://chaos.ssu.runnet.ru/kafedra/edu_work/textbook/khovanovs-01/pos.html